

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.01.010

深厚覆盖层下锚碇沉井基础的 极限承载力及其长期稳定性研究进展

邵国建, 胡 丰

(河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 评述深厚覆盖层下锚碇沉井基础的极限承载力及其长期稳定性问题的国内外研究进展, 重点讨论锚碇沉井基础的极限承载力、短期和长期变位以及稳定性的基本理论和研究方法, 详细阐述在该领域的研究现状和存在问题, 并提出了未来研究重点和发展趋势。

关键词: 深厚覆盖层; 锚碇; 沉井基础; 极限承载力; 综述

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2016)01-0058-07

Progress of research on ultimate bearing capacity and long-term stability of anchorage caisson foundation under deep overburden layer

SHAO Guojian, HU Feng

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Research in China and abroad on the ultimate bearing capacity and long-term stability of an anchorage caisson foundation under a deep overburden layer is reviewed. The basic theories on and research methods applicable to the ultimate bearing capacity, short-term and long-term displacements, and stability of the anchorage caisson foundation are discussed. The research status and existing problems in this field are expounded in detail, and the focus of and trends in future research are also described.

Key words: deep overburden layer; anchorage; caisson foundation; ultimate bearing capacity; review

我国在深厚覆盖层地区已建和待建的跨江、跨湖通道不下数十条, 悬索桥方案将成为这些道通的重要备选方案。如 2012 年建成的泰州长江公路大桥位于长江下游, 河段两岸均为长江中下游冲积平原, 土质松软, 覆盖层厚, 基岩埋藏一般在 180~190 m 以下, 覆盖层的厚度是目前国内外桥梁均没有遇到过的, 且锚碇设置于长江大堤之外, 需要考虑基础开挖对堤坝的扰动影响。为了提供足够的抗力, 在深厚覆盖层地区建设的锚碇基础埋设深度一般达到数十米, 需要进行超深基坑开挖, 导致锚碇基础工程规模大、建设技术复杂、安全风险高。

在深厚覆盖层建设悬索桥的重力式锚碇, 国外常用的基础形式为圆形或矩形的箱型基础, 如日本明石大桥北锚碇采用沉箱基础, 南锚碇采用地下连续墙; 丹麦大贝尔特桥锚碇采用沉井基础方案; 日本南、北备赞濑户桥南锚及中间塔墩的基础均采用沉井基础方案。我国深厚覆盖层下重力式锚碇一般采用深埋箱型基础形式, 如润扬长江公路大桥北锚碇采用矩形地下连续墙, 而南锚碇采用了排桩-冻结基础形式; 江阴长江公路大桥的北锚碇采用了沉井基础; 泰州长江公路大桥南、北锚碇基础和中塔基础均采用了沉井基础。

尽管国内外针对锚碇沉井基础进行了许多研究与工程实践, 但是在设计计算理论等方面依旧不十分成熟。针对深厚覆盖层锚碇沉井基础进行系统研究, 既是实际工程需要, 又可以形成系统研究成果, 可以为我国深厚覆盖层地区进行锚碇沉井基础的设计与施工提供技术支撑, 对提升我国桥梁建设水平具有现实意义。

收稿日期: 2015-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(51278169); 国家自然科学基金青年基金(51308189)

作者简介: 邵国建(1962—), 男, 浙江台州人, 教授, 博士, 主要从事地下工程力学分析理论与方法研究。E-mail: gjsiao@hhu.edu.cn

1 深厚覆盖层下锚碇沉井基础的极限承载力研究

1.1 研究现状

地基承载力的传统确定方法有3类:第一类是根据地基土的抗剪强度指标以理论公式计算;第二类是按现场地基土的静荷载试验得到的P-S曲线确定;第三类是按规范中提供的承载力公式确定。近年来,在计算机技术飞速发展的基础上,用有限元方法计算地基极限承载力的方法也得到了普遍接受。

在理论研究方面,土压力、地基承载力和边坡稳定是极限承载力问题在土力学发展过程中的三大问题。索科洛夫斯基^[1]、Chen^[2]指出,这三大问题都基于共同的极限平衡分析原理,可以采用相同的分析方法。土体极限分析研究可以追溯到1773年,库伦提出了著名的库伦屈服准则,为土体破坏理论奠定了基础^[3]。极限分析中上、下限定理的提出,标志着极限分析理论趋于成熟,基于极限定理的极限分析法受到了广泛的重视。

Prandtl根据塑性理论,导出了刚性基础压入无质量土中的滑动面形状及其相应的极限承载力公式^[4]。Terzaghi^[5]针对Prandtl-Reissner理论中的部分缺陷,给出了更为切合实际的假定,得到浅埋条形浅基础的极限承载力公式。在诸如沉井基础一类的深基础工程中, Terzaghi地基承载力的分项表达式,因其公式形式简洁,有着广泛的应用^[6]。Meyerhoff理论认为塑性区逐渐从基底向上扩展,当埋深很大时,则达到封闭的梨形塑性区,这种假设考虑了旁侧土的抗剪强度,目前在深基础中也有应用^[7-8]。Hansen在Prandtl理论基础上得到一个半修正的公式,并在深基础工程中得到应用^[3,8]。栾茂田等^[9]提出一种基于滑楔破坏模式的分析方法,表明地基承载力随基础埋深的增大而近似线性地增加。邵国建等^[10]根据刚塑性体的平衡条件,推导方形深基础地基极限承载力的理论解,再结合条形深基础地基极限承载力的理论解,叠加后得到矩形深基础地基极限承载力的解析解。但其滑动面形状大多人为事先假定,且对深埋矩形基础地基极限承载力的理论研究相对较少,尤其对任意形状深埋基础地基极限承载力的理论研究有待完善。

在基础承载特性的试验研究方面,濮家骝等^[11]基于离心模型试验研究,得出浅基础承载力与基础埋深近似呈正比关系。龚维明等^[12]采用自平衡法测试了工程用和试验用2个根式基础的承载性能,研究了轴力、侧阻力和根键弯矩的分布规律,比较了压入根键前后基础承载性能的改变。殷永高等^[13]针对根式基础承载特性的试验与数值模拟,通过现场竖向及水平向荷载试验和数值模拟对比分析,为根式基础承载力的理论分析和简化计算提供依据。目前,针对深埋基础的试验研究鲜有报道,有待加强。

在有限元数值计算方面,鉴于有限元法可以考虑材料的应力应变关系,而且还可以分析地基土体破坏的发展过程,有限元法中增量加载法和假定滑动面法运用得比较多。岩土体的破坏过程在实际工程中是一个渐进性的过程,是由初始的线性弹性状态逐渐过渡到塑性流动的极限破坏状态的。马少坤等^[14]、邓楚键等^[15]应用增量加载有限元分析地基的承载力。赵杰等^[16]利用边坡稳定分析中的滑面应力分析法验算土体结构在达到极限破坏状态时安全系数是否趋近于1.0,并与增量加载法结果进行比较,分析二者与经典Prandtl解的差异。木林隆等^[17]采用弹塑性有限元法,对淮河公路大桥的根式基础原位试验进行数值模拟,探讨数值模拟方法和参数选取的合理性,通过无根键沉井基础和有根键沉井基础的受力特性对比,探讨了根键沿深度位置分布对根式基础承载力的影响。

基于上、下限定理的有限元分析方法是确定地基极限承载力的另一种重要的数值手段。Lysmer^[18]较早将有限元与优化理论相结合,按三角形三节点单元推导得到岩土平面问题的下限解。Sloan^[19-20]提出了搜索下限解答的一种快速算法,该方法被广泛应用到地基^[21-22]与土锚^[23-24]承载力的计算中。Anderheggen等^[25]最早采用有限元方法寻求上限解,但该方法主要用于求解结构问题。Pastor等^[26]、Bottero等^[27]将这一方法引入平面应变岩土问题的求解中。

1.2 存在问题

目前在深埋锚碇基础的地基极限承载力方面还存在诸多问题:

a. 对于深基础工程地基极限承载力的计算,主要是参考JTG D63—2007《公路桥涵地基与基础设计规范》^[28]中浅基础承载力计算公式,并进行相应的深度和宽度修正,是否适用超深沉井基础的计算有待进一步研究。

b. 浅基础工程地基承载力的研究相对较多,也有较多的现场监测数据可供参考,便于建立完善的数值

模型。对于深基础工程而言,现场监测难度较大且难以得到极值状态的现场数据,不利于建立合理的有限元数值模型。

c. 通过数值模拟方法能较好地模拟土与结构的复杂力学性质,而数值分析成败的关键是能否建立反映土的物理性质以及土与结构相互作用的模型。但是岩土工程本身及施工环境的诸多不确定性,使得难以对深基础工程建立十分恰当的数值模型。

d. 锚碇沉井系统受缆索斜向拉力较大,基底受力形式不同于一般的深基础工程,需要对其地基承载力建立合理的确定方法,而现行规范中未提及,国内外这方面的研究也较少。

1.3 研究重点和方向

a. 反映非线性效应的地基承载力计算模型。基于数值试验和模型试验的结果进行比较以确定有关模型参数,建立三维数值仿真模型,研究基底承载力的变化规律,并与实际量测结果进行对比分析,进而建立反映非线性效应的地基承载力计算模型。

b. 锚碇沉井基础极限承载力的计算方法。针对影响地基承载力的主要因素进行敏感性分析,考虑基础埋深和宽度的影响效应,并计入基础底部地下水位变化的影响,建立锚碇基础极限承载力的计算方法。

2 深厚覆盖层下锚碇沉井基础短期与长期变位研究

2.1 研究现状

在20世纪60年代以前,锚块和基础的稳定性分析无论是直接基础,还是沉井、沉箱等基础,其锚碇自身的滑移、锚块的下沉、锚块在主缆竖向分力作用下发生倾倒都是不允许的。从1964年美国建成韦拉扎诺桥开始,悬索桥锚碇可以搁在软质地基上,允许下沉,严格限制滑动,尽量减少倾覆量。然而对于土质地基,特别是软土地基,国内外对建造在软土地基上悬索桥重力式锚碇的变位研究报道较少。锚碇基础与周围土体相互作用的接触面问题,也是中外学者研究的重点。此外,土体的应力应变呈现明显的弹塑性特征,弹塑性本构模型比非线性模型能更真实地反映土体的变形特性,但因弹塑性模型的参数不易获取,参数的准确性成为其发展和应用的制约因素,在实际工程中其应用反而不如非线性模型广泛,但仍然是一种值得发展的方法。Gerolymos等^[29-31]依据Winkler模型提出了水平受荷刚性沉井静力与动力位移分析方法;胡丰等^[32]以经典库仑摩擦定律代替假想的弹簧模型,按Winkler模型计算沉井基底井身水平反力。由接触面上位移协调条件,推导沉井水平位移计算公式、滑移临界荷载公式、沉井水平承载力增强系数与埋深变化关系。

在数值模拟方面,宋二祥等^[33]针对润扬长江公路大桥北锚碇基础施工开挖50m的深基坑,进行了三维非线性有限元分析,给出锚碇基坑支护结构的内力和变形,并对有关影响因素进行了分析。李家平等^[34]采用室内相似模型试验和数值模拟方法,针对某悬索桥重力式锚碇变位问题进行研究,结果表明锚碇基础下部地基加固、锚碇基坑围护结构以及锚碇周围土体对提高锚碇稳定性具有积极作用。孙钧等^[35]结合润扬长江公路悬索大桥北锚碇基础进行施工变形监控与预测工作实践,在现场系统开展了对锚碇基坑变形的人工智能神经网络多步滚动预测研究。张继周等^[36]将土性参数中的压缩模量作为随机场而非传统意义上的随机变量,利用随机场的局部平均理论,结合目前基础设计中沉降计算的分层总和法,推导了能够反映土性参数空间变化特性的基础沉降表达式。王东栋等^[37]针对泰州长江公路大桥群桩基础的工后沉降问题,采用黏弹性理论,结合室内流变试验,从理论上推导了广义Kelvin模型中两类参数的相互转换关系,并建立了将黏弹性系数转化为Prony级数的计算公式,从而将室内流变试验数据通过上述研究成果应用于泰州长江公路大桥,并采用Abaqus软件对其工后沉降进行了数值计算分析。现有的数值模拟主要针对深基础施工期的变位,而对深基础运行期的长期变位涉及较少,其相关计算模型和数值模拟方法有待进一步研究。

2.2 存在问题

目前规范^[28]上对锚碇基础的变位计算延续传统的分层沉降法,该方法对于基底地层分布单一的浅埋基础较为合适,但是对于施工工况变化大、基底地质复杂、埋设深度与平面尺寸大的锚碇基础,实测与理论计算已经证明分层沉降法不能够完全反映实际情况,不仅不能计算锚碇的长期变形,而且对不均匀沉降也难以准确预测。理论研究中经常采用适用性更有效的数值模型进行分析,但是这些计算模型不仅建模复杂,而且也没有统一的建模依据。由于悬索桥是一种柔性结构,为满足主塔以及整个桥梁体系的稳定要求,锚碇基础的最大水平位移与最大垂直位移都必须控制在一定的数值范围内,研究锚碇基础的瞬间变位以及长期变形都

显得十分重要。针对锚碇的沉井基础,由于施工过程复杂,结构在不断变化,而且外力状况也在不断变化,涉及渗流、蠕变等各种情况。因此,需要针对不同阶段建立相应的仿真模型,进行锚碇基础短期与长期变位的预测。

2.3 研究重点和方向

a. 锚碇沉井基础沉降计算的耦合模型。基于不同层位地层物理力学特性差异的特点,研究锚碇基础与地层相互作用的机理。遵循几何、本构、应力状态和动态过程仿真建模的原则,建立能反映施工全过程各种变形特征的锚碇沉井基础沉降计算的耦合模型。

b. 锚碇沉井基础长期变位的计算理论。基于室内试验和工程类比,结合已有工程监测成果,计入岩土体和接触面参数的不确定性,以确定性和不确定性两类分析模型,建立能够对不均匀沉降以及长期变形进行预测的数值计算模型与相应的计算理论。

3 深厚覆盖层下锚碇沉井基础的失稳机理与稳定性评价

3.1 研究现状

锚碇是悬索桥主要的承力结构物,将主缆拉力传递给地基基础,承受着较大的主缆拉力,是支撑主缆、保证全桥主体结构受力稳定的关键部位。鉴于锚碇系统在悬索桥中的重要性,其稳定性问题显得十分重要。一般规定锚碇滑动安全系数取值平时大于2.0,地震时大于1.2^[38]。而锚碇系统的摩阻力是由基岩与锚碇系统接触面的正应力与摩擦系数来决定的,摩擦系数一般都由相似原理进行模型试验或现场测试得到。

在工程结构安全度问题的理论与数值模拟方面,郑颖人等^[39]基于超载法评价边坡的稳定性。邬爱清等^[40]利用模型试验结合数值计算对隧道锚与围岩岩体变形机制、时效特征及超载安全性等方面开展系统研究。邵国建等^[41]针对润扬长江公路大桥北锚碇基础,考虑浇筑过程中地下水位改变引起基底水压力的变化对锚碇基础接触应力分布的影响,基于数值模拟仿真分析,揭示了悬索桥重力式锚碇基础接触应力在施工到运行全过程中的变化规律。苏静波等^[42]基于三维有限元仿真分析,针对润扬长江公路大桥北锚碇基础抗滑移、抗倾覆稳定进行了计算,分析基础前、后墙土体压力对锚碇基础稳定性的影响,给出了抗滑稳定安全系数和抗倾覆稳定安全系数的计算表达式,并且探讨了基底接触面摩擦强度指标对抗滑移稳定性的敏感程度。

在锚碇基础的模型试验研究方面,李永盛^[43]采用室内模型试验(按1:100的相似材料模型),根据观测结果探讨了江阴长江大桥北锚碇结构的变形机制和破坏失稳形式。李家平等^[44]根据相似理论,对宁波庆丰悬索桥重力式锚碇进行了室内相似模型试验研究(相似模型的几何相似常数为1:100),得到软土中锚碇自身和相邻土体的变位、土体中附加应力分布等随锚索力和时间的变化规律,表明锚碇基础下部地基加固。锚碇基坑围护结构以及锚碇周围土体对提高锚碇稳定性具有显著作用。目前,针对锚碇基础开展的模型试验研究的实例不多,加上已有试验模型比尺过小,仅能得到其稳定性评判的定性结论,难以把握具体工程实际的定量结果。

3.2 存在问题

现有规范^[28]中的锚碇稳定性计算基本还是延续桥涵地基基础中的浅埋刚性基础的基本假定,即刚体转动与滑动的基本假设,提出了进行抗滑移与抗倾覆计算的理论公式与经验控制指标,实际设计时一般不予考虑锚碇前侧被动抗力影响,仅作为安全储备。已有学者通过现场试验以及理论分析等对此进行了研究:锚碇在倾覆状态下,基础前端与后端地基土提供极大抵抗力,对锚碇的抗滑、抗倾覆稳定发挥了重要作用。

目前的锚碇设计过程为基于稳定性控制的设计计算,即首先根据基础的抗滑、抗倾覆要求确定持力层与基础几何尺寸后,对基础的变位进行验算;计算过程中不考虑侧壁摩擦阻力的简化,三维有限元计算表明,现场实测与理论计算结果差异明显。此外,现有针对锚碇基础的室内模型试验研究资料不多,并且已有的模型试验比尺(几何相似常数1:100)也偏小,难以合理地揭示锚碇基础的失稳机理。

3.3 研究重点和方向

a. 锚碇沉井基础抗滑与抗倾覆稳定性。针对现有规范^[28]中稳定性计算理论是在传统浅埋基础上得到的缺陷,根据锚碇基础极限承载力与变形控制的要求,建立锚碇抗滑与抗倾覆的验算方法。

b. 警戒临界控制指标的研究。考虑土体参数、荷载和结构抗力的不确定性,基于原型监测信息反馈发现问题,利用反演结果进行变形与稳定性计算模型修正,进而以基础极限承载力和临界变形警戒值为广角度

量化控制指标,给出或预报基础稳定性的综合评判。

4 结 语

通过开展深厚覆盖层下锚碇沉井基础的极限承载力和长期稳定性研究,明确深厚覆盖层下锚碇基础的受力机制与变形特性,结合模型试验和数值模拟试验,探讨锚碇基础的覆土效应与破坏机理。基于不同尺寸、不同埋深的锚碇基础模型试验和数值模拟试验,分析锚碇基础承载力与基础平面尺寸和埋深的关系,建立反映非线性效应的承载力计算模型,给出锚碇基础极限承载力的计算方法。从多层次和广角度分析观点,对锚碇基础的变形和长期稳定性进行研究,以基础极限承载力和临界变形警戒值为广角度量化控制指标,给出或预报锚碇基础稳定性的综合评判,为完善锚碇沉井基础稳定性的计算理论以及制定相关标准提供依据。

参考文献:

- [1] 索科洛夫斯基 B B. 松散介质静力学[M]. 北京:地质出版社,1956.
- [2] CHEN W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Co,1975.
- [3] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,1995.
- [4] VESIC A S. Analysis of ultimate loads of shallow foundation[J]. Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE, 1973,99(SM1):45-73.
- [5] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons,1944.
- [6] 陈从春,张季如,肖汝诚. 砂土中深基基底极限承载力分析[J]. 土木工程学报,2005,38(8):102-106. (CHEN Congchun, ZHANG Jiru, XIAO Rucheng. Analysis for the ultimate bearing capacity of deep foundations in sands [J]. China Civil Engineering Journal, 2005,38(8): 102-106. (in Chinese))
- [7] MEYERHOF G G, HANNA A M. Design charts for ultimate bearing capacity of foundations on sand overlying soft clay [J]. Canadian Geotechnical Journal,1980,17:300-303.
- [8] MEYERHOF G G, HANNA A M. Ultimate bearing capacity of foundations on a three-layers soil [J]. Canadian Geotechnical Journal,1979,16:412-414.
- [9] 栾茂田,林皋,郭莹. 土体稳定分析的改进滑楔模型及其应用[J]. 岩土工程学报,1995,17(4):1-9. (LUAN Maotian, LIN Gao, GUO Ying. Generalized sliding-wedge and its application to stability analysis in soil mechanics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995,17(4):1-9. (in Chinese))
- [10] 邵国建,周旋,胡丰. 矩形深基础地基极限承载力的理论解[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(增刊2):4305-4311. (SHAO Guojian, ZHOU Xuan, HU Feng. Theoretical solution of ultimate bearing capacity of deep rectangle foundation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014,33(Sup2):4305-4311. (in Chinese))
- [11] 濮家骝,高汉楼. 浅基础承载力离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报,1988,10(6):1-18. (PU Jialiu, Ko Honyim. A study of bearing capacity by centrifugal footing tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988,10(6):1-18. (in Chinese))
- [12] 龚维明,胡丰,童小东,等. 根式基础竖向承载性能的试验研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(12):1789-1795. (GONG Weiming, HU Feng, TONG Xiaodong, et al. Experimental study on vertical bearing capacity of root foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008,30(12):1789-1795. (in Chinese))
- [13] 殷永高,孙敦华,龚维明. 根式基础承载特性的试验与数值模拟研究[J]. 土木工程学报,2009,42(12):162-169. (YIN Yonggao, SUN Dunhua, GONG Weiming. Experiment and numerical simulation of the bearing characteristics of root foundations [J]. China Civil Engineering Journal, 2009,42(12):162-169. (in Chinese))
- [14] 马少坤,于劲,刘怡林. 浅基础地基极限承载力的有限元分析[J]. 武汉理工大学学报,2007,29(4):99-102. (MA Shaokun, YU Jin, LIU Yilin. Finite element analysis for ultimate bearing capacity of shallow foundation [J]. Journal of Wuhan University of Tecnology, 2007,29(4):99-102. (in Chinese))
- [15] 邓楚键,孔位学,郑颖人. 极限分析有限元法讲座Ⅲ:增量加载有限元法求解地基极限承载力[J]. 岩土力学,2005,26(3):500-504. (DENG Chujian, KONG Weixue, ZHENG Yingren. Analysis of ultimate bearing capacity of foundations by elastoplastic FEM through step loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005,26(3):500-504. (in Chinese))
- [16] 赵杰,邵龙潭. 土体结构极限承载力的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(增刊1):3183-3189. (ZHAO Jie, SHAO Longtan. Finite element analysis of ultimate bearing capacity of soil mass structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(Sup1):3183-3189. (in Chinese))
- [17] 木林隆,黄茂松,龚维明,等. 水平荷载作用下根式基础受力特性分析[J]. 岩土力学,2010,31(1):287-292. (MU Linlong,

- HUANG Maosong, GONG Weiming, et al. Response analysis of anchorage foundation under lateral loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1):287-292. (in Chinese))
- [18] LYSMER J. Limit analysis of plane problems in soil mechanics[J]. Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE, 1970, 96(SM4): 1311-1334.
- [19] SLOAN S W. Lower bound limit analysis using finite elements and linear programming[J]. Int J Numer Analyt Methods Geomech, 1988, 12(1): 61-67.
- [20] SLOAN S W. A steepest edge active set algorithm for solving sparse linear programming problems[J]. Int J Numer Methods Engng, 1988, 26(12): 2671-2685.
- [21] UKRITCHON B, WHITTLE A J, SLOAN S W. Undrained limit analysis for combined loading of strip footings on clay[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1998, 124(3): 265-276.
- [22] MERIFIELD R S, SLOAN S W, YU H S. Rigorous solutions for the bearing capacity of two layered clay soils[J]. Geotechnique, 1999, 49(4): 471-490.
- [23] MERIFIELD R S, SLOAN S W, YU H S. Stability of plate anchors in undrained clay[J]. Geotechnique, 2001, 51(2): 141-153.
- [24] MERIFIELD R S, LYAMIN A V, SLOAN S W. Three dimensional lower bound solutions for the stability of plate anchors in sand[J]. Geotechnique, 2006, 56(2): 123-132.
- [25] ANDERHEGGEN E, KNOPFEL H. Finite element limit analysis using linear programming[J]. Int J Solids Struct, 1972, 8(12): 1413-1431.
- [26] PASTOR J, TURGEMAN S. Mise en oeuvre numerique des methodes de l'analyse limite pour les materiaux de von Mises et de Coulomb standards en deformation plane[J]. Mechanics Research Communications, 1976, 3(6): 469-476. (in French)
- [27] BOTTERO A, NEGRE R, PASTOR J, et al. Finite element method and limit analysis theory for soil mechanics problems[J]. Comput Methods Appl Mech Engng, 1980, 22(1): 131-140.
- [28] 中交公路规划设计院有限公司. JTG D63—2007 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [29] GEROLYMOS N, GAZETAS G. Winkler model for lateral response of rigid caisson foundations in linear soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(5): 347-361.
- [30] GEROLYMOS N, GAZETAS G. Static and dynamic response of massive caisson foundations with soil and interface nonlinearities-validation and results[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(5): 377-394.
- [31] GEROLYMOS N, GAZETAS G. Development of Winkler model for static and dynamic response of caisson foundations with soil and interface nonlinearities[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(5): 363-376.
- [32] 胡丰, 邵国建. 基于库仑摩擦定律的沉井基础水平位移分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊1): 3056-3061. (HU Feng, SHAO Guojian. Analysis of lateral displacement of caisson foundation based on coulomb law of friction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup1): 3056-3061. (in Chinese))
- [33] 宋二祥, 姜鹏, 陆新征, 等. 某特深基坑支护的非线性三维有限元分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 538-543. (SONG Erxiang, LOU Peng, LU Xinzhen, et al. Nonlinear 3D finite element analysis of an extremely deep excavation support system[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(4): 538-543. (in Chinese))
- [34] 李家平, 李永盛, 王如路. 悬索桥重力式锚碇结构变位规律研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 145-150. (LI Jiaping, LI Yongsheng, WANG Rulu. Research on displacement of anchorage of suspension bridge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 145-150. (in Chinese))
- [35] 孙钧, 赵其华, 熊孝波. 润扬长江公路大桥北锚碇基础施工变形的智能预测: 工程实录研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊1): 1-7. (SUN Jun, ZHAO Qihua, XIONG Xiaobo. Intelligent prediction on deformations in the construction of anchor block-abutment foundation of an extremely long-span suspension bridge (Runyang Bridge over Yangzi River): a case history study[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(Sup1): 1-7 (in Chinese))
- [36] 张继周, 缪林昌. 基于随机场理论的地基概率沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1059-1064. (ZHANG Jizhou, MIAO Linchang. Probabilistic foundation settlement based on random field theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 1059-1064. (in Chinese))
- [37] 王东栋, 许建聪, 冯兆祥. 泰州长江大桥群桩基础工后沉降数值分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2009, 10(6): 570-574. (WANG Dongdong, XU Jiancong, FENG Zhaoxiang. Numerical analysis on post-construction settlement of pile group foundation for Taizhou Yangtze River Bridge[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science) Edition, 2009, 10(6): 570-574. (in Chinese))
- [38] 沈华春. 吊桥设计技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1995.

- [39] 郑颖人,赵尚毅. 边(滑)坡工程设计中安全系数的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9):1937-1940. (ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi. Discussion on safety factors of slope and landslide engineering design[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9):1937-1940. (in Chinese))
- [40] 邬爱清,彭元诚,黄正加,等. 超大跨度悬索桥隧道锚承载特性的岩石力学综合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 433-441. (WU Aiqing, PENG Yuancheng, HUANG Zhengjia, et al. Rock mechanics comprehensive study of bearing capacity characteristics of tunnel anchorage for super-large span suspension bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 433-441. (in Chinese))
- [41] 邵国建,苏静波,胡强. 润扬大桥悬索桥北锚碇基础接触应力仿真分析[J]. 中国工程科学, 2006, 8(6):28-34. (SHAO Guojian, SU Jingbo, HU Qiang. Numerical simulation of contact stresses under north anchor foundation of Runyang Suspension Bridge[J]. Engineering Science, 2006, 8(6):28-34. (in Chinese))
- [42] 苏静波,邵国建,刘宁. 悬索桥锚碇基础的稳定性分析[J]. 公路, 2005(4):61-65. (SU Jingbo, SHAO Guojian, LIU Ning. Stability analysis of anchor foundations of suspension bridge[J]. Highway, 2005(4):61-65. (in Chinese))
- [43] 李永盛. 江阴长江公路大桥北锚碇模型试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1995, 23(2): 134-140. (LI Yongsheng. Experimental study on the north anchorage of the Jiangyin Yangtze Bridge[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 1995, 23(2): 134-140. (in Chinese))
- [44] 李家平,张子新,黄宏伟,等. 宁波庆丰大桥锚碇室内相似模型试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(8): 1011-1016. (LI Jiaping, ZHANG Zixin, HUANG Hongwei, et al. Research on similarity model test of anchorage of Qingfeng Suspension Bridge in Ningbo[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2005, 33(8):1011-1016. (in Chinese))

· 简讯 ·

第八届全国河湖治理与水生态文明发展论坛将在南昌市举办

第八届全国河湖治理与水生态文明发展论坛将于2016年4月8—10日在南昌市举办。主办单位为中国水利技术信息中心、东方园林股份有限公司,承办单位为水利部鄱阳湖水资源水生态环境研究中心,协办单位为江西省水利学会、清华大学东方生态研究中心、河北省水利水电勘测设计研究院、长江科学院。

本届论坛主要内容包括6个方面:(1)最严格的水资源管理制度;(2)水环境治理与水生态修复;(3)滨水景观设计与生态护坡;(4)海绵城市建设与水系规划;(5)PPP模式与加强我国水利现代化建设结合;(6)水利现代化技术(大数据)应用与水利智库建设。

详见 <http://www.hhu.edu.cn/s/1/t/2655/3e/b2/info147122.htm>

(本刊编辑部供稿)